第48卷 第2期
2025年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 2
Feb. 2025

喀什三角洲NDVI演变特征及其对气候的响应

张海东， 李崇博， 孟李奇， 阿地来·赛提尼亚孜， 巨喜锋

（中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心，新疆 乌鲁木齐 830057）

摘 要：为探究植被生长变化趋势和气候因子对植被生长的影响程度，基于MODIS植被指数数据和同期逐月平均气温、逐月降水量数据，采用线性趋势分析法、Pearson相关分析法和偏相关分析法等方法，对2000—2020年新疆喀什三角洲不同季节归一化植被指数（NDVI）时空变化特征及其对平均气温、降水量的响应关系进行了研究。结果表明：(1) 研究区NDVI整体呈极显著上升趋势，生长季、春、夏、秋季呈显著极显著增加面积占比为79.8%、71.2%、72.1%、91.3%。(2) 研究区NDVI对平均气温、降水量的整体响应关系不显著，降水量对NDVI的影响占主导地位，但存在季节差异和空间显著作用。生长季NDVI与平均气温呈负相关、与降水量呈正相关，春、夏季NDVI与平均气温、降水量均呈正相关，秋季NDVI与平均气温、降水量均呈负相关。(3) 研究区平均气温对NDVI时滞响应以负相关为主，降水量对NDVI时滞响应以正相关为主，表明气温升高对植被生长有抑制作用，降水量增加对植被生长有促进作用，且降水量比平均气温对NDVI的滞后性强。研究结果可以为干旱区生态环境变化分析和生态保护修复提供参考依据。

关 键 词：NDVI；时空变化；气候因子；喀什三角洲

文章编号：1000－6060(2025)02－0296－12(0296～0307)

在全球气候变化背景下，陆地植被在参与物质与能量循环的同时，在生态和生物多样性保护[1]、生态环境调节[2]、灾害防治[3]方面起到了重要作用。研究植被与气候因子的响应关系已成为热点话题[4]，利用长时间动态监测数据研究水热条件对植被生长的影响，有助于分析评价植被生长时空变化趋势[5]。根据植被生长光谱特征，利用植被指数可以直接有效度量和评估植被生长状况，归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）就是最常用的一种指示植被覆盖的因子[6]。研究发现，青藏高原的NDVI在所有时间尺度上普遍增加，在年际尺度和秋季NDVI对地表温度有显著的负面影响，而在春季则有显著的正面影响[7]。泾河流域的NDVI呈现从西北向东南递减的空间趋势，NDVI与降水量之间呈正相关关系，揭示了黄土高原植被生长更多依赖于降水量提供的水分供应[8]。1982—2016年中国西北地区NDVI与气温、降水的变化关系表现为弱的正相关[9]；1982—2013年南疆地区蒸发量大，降水量小，气温稳定上升，降水量呈逐渐上升趋势[10]；近百年来全球变暖引起了新疆地区降水量增加和气温升高，对植被覆盖具有积极作用[11]；2003—2010年南疆NDVI与气温、降水量变化存在滞后性，对气温滞后性强于降水量[12]；通过对1982—2015年西北地区不同季节NDVI与气候因子相关性分析认为，中国北方生长季NDVI与气候因子呈正相关，对气温响应强于降水量，夏季NDVI与降水量相关性强于气温，秋季与气温相关性强于降水[13]。受气候变化影响，克孜勒苏柯尔克孜自治州和喀什地区，植被净初级生产力的大小与气温和降水的分布关系密切，当降水量增加时，50.3%的区域呈现植被净初级生产力增加趋势，当气温升高时，研究区43.7%的区域呈现植被净初级

收稿日期：2024-05-15； **修订日期**：2024-08-30

基金项目：兵地融合发展重点地区生态修复综合调查(DD20230484)；干旱绿洲区生态地质环境监测评价关键技术研究(KC20230016)资助

作者简介：张海东(1991-)，男，工程师，主要从事水文地质、生态地质、基础地质调查评价研究. E-mail: zhanghaidong@mail.cgs.gov.cn

通讯作者：李崇博(1985-)，男，高级工程师，主要从事水文地质、工程地质、生态地质、地质灾害调查评价研究. E-mail: lichongbo01@126.com

生产力增加趋势[14]。

上述研究主要从较大空间尺度开展，多数针对长时间序列年际变化分析，对年度不同季节变化趋势和相关性分析较少。喀什三角洲地处新疆西南部干旱半干旱区，作为南疆棉田经济作物的支柱，但生态系统较为脆弱，一定程度上制约了经济发展。由于区域内分布的气象观测站点较少，无法满足大尺度研究，故而采用气候模式数据，基于2000—2020年植被指数数据和同期气候数据，对喀什三角洲长时间序列和不同季节NDVI变化趋势及其对气候因子的响应进行研究分析，有助于研究喀什三角洲生态环境变化趋势，能够为区域生态环境保护修复和社会经济发展提供参考依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

研究区位于新疆西南部，塔里木盆地西缘，南部、西部和北部以主要河流出山口为界；东部以沙漠地带为界，主要涵盖喀什市、疏附县、疏勒县、阿克陶县、英吉沙县、岳普湖县和伽师县的平原区。地理位置介于38°36′~39°52′N，75°22′~77°18′E之间，总面积约10202 km²，平面上从西向东宽度逐渐增大，呈"三角形"展布。总体地势为西部、南部与北部海拔高，东部海拔低，气候为典型的暖温带内陆性干旱性沙漠气候特征，多年平均气温为12.55 ℃，多年平均降水量为80.57 mm，多年水面蒸发量高达2400~3000 mm[15]。区内植被类型主要为荒漠类、草甸类和人工植被，总体上全区均有分布，荒漠类主要分布在喀什市至伽师县北部，草甸类主要分布在阿克陶县东部、英吉沙县北部及岳普湖县一带，人工植被主要分布在研究区中部，面积占比分别为36.30%、33.99%和29.71%。荒漠植被有温带灌木、温带草原化灌木、温带半灌木和矮半灌木、温带多汁盐生矮半灌木等；草甸植被包括温带盐生禾草、杂类草；人工植被以两年三熟或一年两熟旱作和落叶果树为主[16]（图1）。

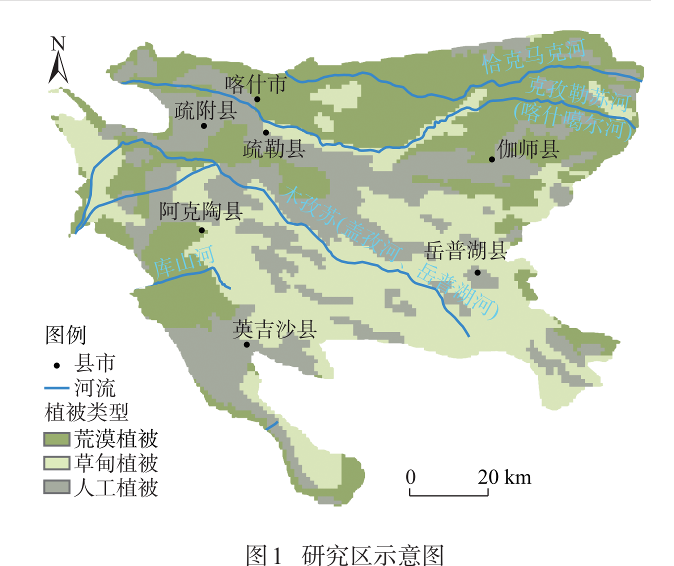


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

1.2　数据来源与处理

增强型植被指数（Enhanced vegetation index，EVI）数据来源于美国航空航天局（NASA，https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/）网站提供的陆地标准产品MOD13Q1（全球250 m分辨率16 d合成）植被指数数据集，时间分辨率16 d，空间分辨率250 m。本文使用该数据时间跨度为2000—2020年EVI栅格数据集，采用ArcGIS 10.6空间分析工具对不同季节按年度时间序列求取均值，由于原数据集被乘以了255，因此将该数据除以255求得真实NDVI值。

气温、降水量数据来自国家地球系统科学数据中心（https://loess.geodata.cn）数据集的中国逐月平均气温、逐月降水量数据，空间分辨率0.0083333°（约1 km）。该数据集是根据英国东英格利亚大学气候研究所（Climate Research Unit，CRU）发布的全球0.5°气候数据以及全球高分辨率气候数据分享平台（WorldClim）发布的全球高分辨率气候数据，通过Delta空间降尺度方案在中国地区降尺度生成，并用496个独立气象观测点数据进行验证，验证结果可信[17]。气温单位0.1 ℃，降水单位0.1 mm。本文使用该数据时间跨度2000—2020年，采用ArcGIS 10.6对nc文件进行格式转换、波段提取、均值求取等。

1.3　研究方法

1.3.1　描述性统计　根据研究区气候季节及其长度变化特征，将各季节起止期选定为：生长季为4—11月、春季3—5月、夏季6—9月、秋季10—11月[18]。基于2000—2020年月度植被指数、平均气温和降水量数据，用ArcGIS 10.6工具输出逐年和生长季、春、夏、秋季NDVI、平均气温和降水量平均值，用Excel软件计算NDVI、平均气温和降水量时间尺度的变化特征，生成清晰直观的折线图，用SPSS软件输入时间尺度上NDVI、平均气温和降水量序列值，进行相关性分析。

1.3.2 线性趋势分析 为了研究NDVI、平均气温和降水量空间变化规律，本文采用一元线性回归法计算3个因子的变化特征[19]，具体计算公式如下：

$$\mathrm{slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}\left(i\times \mathrm{NDVI}_i\right)-\left(\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NDVI}_i\right)\times\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)}{n\times\sum_{i=1}^{n}\left(i^2\right)-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{1}$$

式中：slope为变化趋势斜率，slope>0时，表示NDVI增加趋势；slope=0时，表示NDVI无明显变化趋势；slope<0时，表示NDVI减小趋势。n为时间序列数(2020−2000+1=21)；i为时间序列年份序号，本文定义2000年为1，2001年为2，……，2020年为21；NDVI_i为第i年的NDVI值。

对NDVI变化趋势显著性检验采用F检验方法完成[20]，计算公式如下：

$$F=U\times\frac{n-m-1}{Q} \tag{2}$$

$$U=\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{\mathrm{NDVI}_i}-\overline{\mathrm{NDVI}}\right)^2 \tag{3}$$

$$Q=\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{NDVI}_i-\overline{\mathrm{NDVI}_i}\right)^2 \tag{4}$$

式中：U为误差平方和；Q为回归平方和，回归自由度为1；m为变量数；$\overline{\mathrm{NDVI}_i}$为第$i$年NDVI线性回归值；$\overline{\mathrm{NDVI}}$为NDVI的平均值。

根据F检验结果与其临界值比较，将NDVI变化趋势分为6个等级：不显著减少(slope<0，P>0.05)、显著减少(slope<0，0.01≤P≤0.05)、极显著减少(slope<0，P≤0.01)、不显著增加(slope>0，P>0.05)、显著增加(slope>0，0.01≤P≤0.05)、极显著增加(slope>0，P≤0.01)。

1.3.3 Pearson相关分析 为了分析NDVI与气候因子空间变化，采用Pearson相关分析对喀什三角洲不同季节NDVI与平均气温、降水量进行相关性计算[21]，公式如下：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\mathrm{NDVI}_i-\overline{\mathrm{NDVI}}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{NDVI}_i-\overline{\mathrm{NDVI}}\right)^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{5}$$

式中：r为变量NDVI与气候因子y的相关系数；y_i为第i年降水量；$\bar{y}$为降水量的平均值。其中，r范围为[−1, 1)，−1≤r<0时，表明变量之间负相关；0≤r<1时，表明变量之间正相关；当r=0时，表明变量之间不相关；|r|越趋近于1，表明NDVI与气候因子相关性越强。将相关性分析结果与r界值进行比对，分为2个等级，即不显著(P≥0.05)和显著(0<P<0.05)。

1.3.4 偏相关分析 在多种要素构成的复杂生态系统中，任何要素的变化都会对整个生态系统产生影响[22]，为单独研究2000—2020年喀什三角洲不同季节气候对NDVI影响程度，采用偏相关分析法，通过在像元尺度上计算NDVI与气候因子偏相关系数来分析NDVI对气候的响应程度[23]。计算公式如下：

$$r_{xy\cdot z}=\frac{r_{xy}-r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{\left(1-r_{xy}^2\right)\left(1-r_{yz}^2\right)}} \tag{6}$$

式中：r_{xy}、r_{xz}、r_{yz}分别为要素x与y、x与z、y与z之间的相关系数；$r_{xy\cdot z}$为将z固定后，变量x与y的偏相关系数。其中，x、y相关系数为下式：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{7}$$

式中：x_i为第i年的平均气温；$\bar{x}$为平均气温的平均值。

对于偏相关系数显著性，采用t检验[24]。计算公式为：

$$t=\frac{r_m}{\sqrt{1-r_m^2}}\sqrt{n-m-1} \tag{8}$$

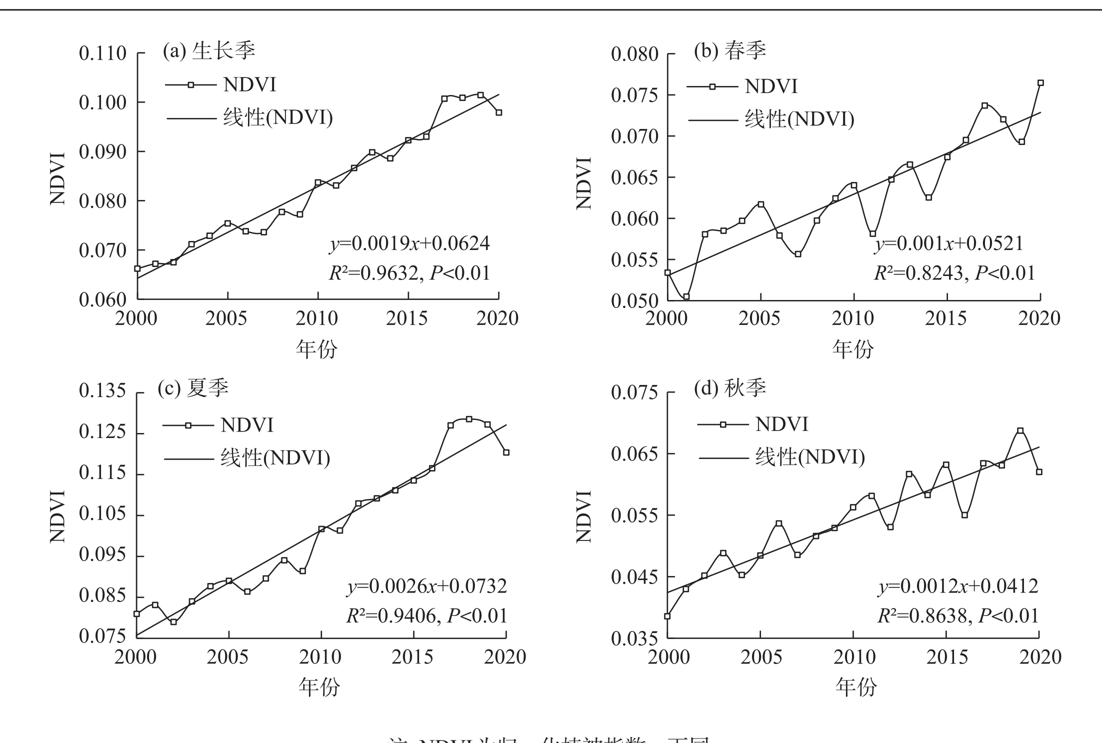
式中：t为相关系数的显著性检验结果，将t检验结果与其界值$t_{0.01}$和$t_{0.05}$比较，将显著水平分为3个等级：$t<t_{0.01}$时，偏相关极显著；$t_{0.01}\le t\le t_{0.05}$时，偏相关显著；$t>t_{0.05}$时，偏相关不显著。

2 结果与分析

2.1 喀什三角洲不同季节时间尺度NDVI变化特征

由图2a可知，植被生长季NDVI在2000—2020年呈极显著增加趋势(R^2=0.9632，P<0.01)，但年际变化呈波动增长趋势，并非持续增加。植被生长季NDVI最高0.101，最低0.066，在2014年和2020年较前一年有较大减少。从同比变化看，NDVI在2000—2005年间持续递增，2006—2014年交替正负递增趋势，2015—2019年递增，2020年出现递减。相较于2000年变化来看(2001—2020年)，植被NDVI全部正增长，2017年增长量最大。

春季NDVI年际变化呈极显著增长趋势(R^2=0.8243，P<0.01)，但年内变化呈正负波动增长趋势，



注：NDVI为归一化植被指数。下同。

图2　2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI年际变化

Fig. 2　Interannual variation of NDVI in different seasons in the Kashi Delta during 2000—2020

在2011年和2014年出现较大负增长。NDVI同比变化总体呈缓慢增长趋势，但在2011年和2014年出现强烈震荡下降拐点。相较2000年，NDVI仅在2001年出现负增长，2002—2020年逐年正增长(图2b)。

夏季NDVI年际变化呈极显著增长趋势(R^2=0.9406，P<0.01)，在2001—2010年间呈波动增长趋势，2011—2018年持续增长，2019年开始持续减小。从同比变化看，NDVI在2001—2011年间正负交替递增，在2002年出现最大递减拐点。相比2000年，NDVI在20 a间呈持续增长趋势(图2c)。

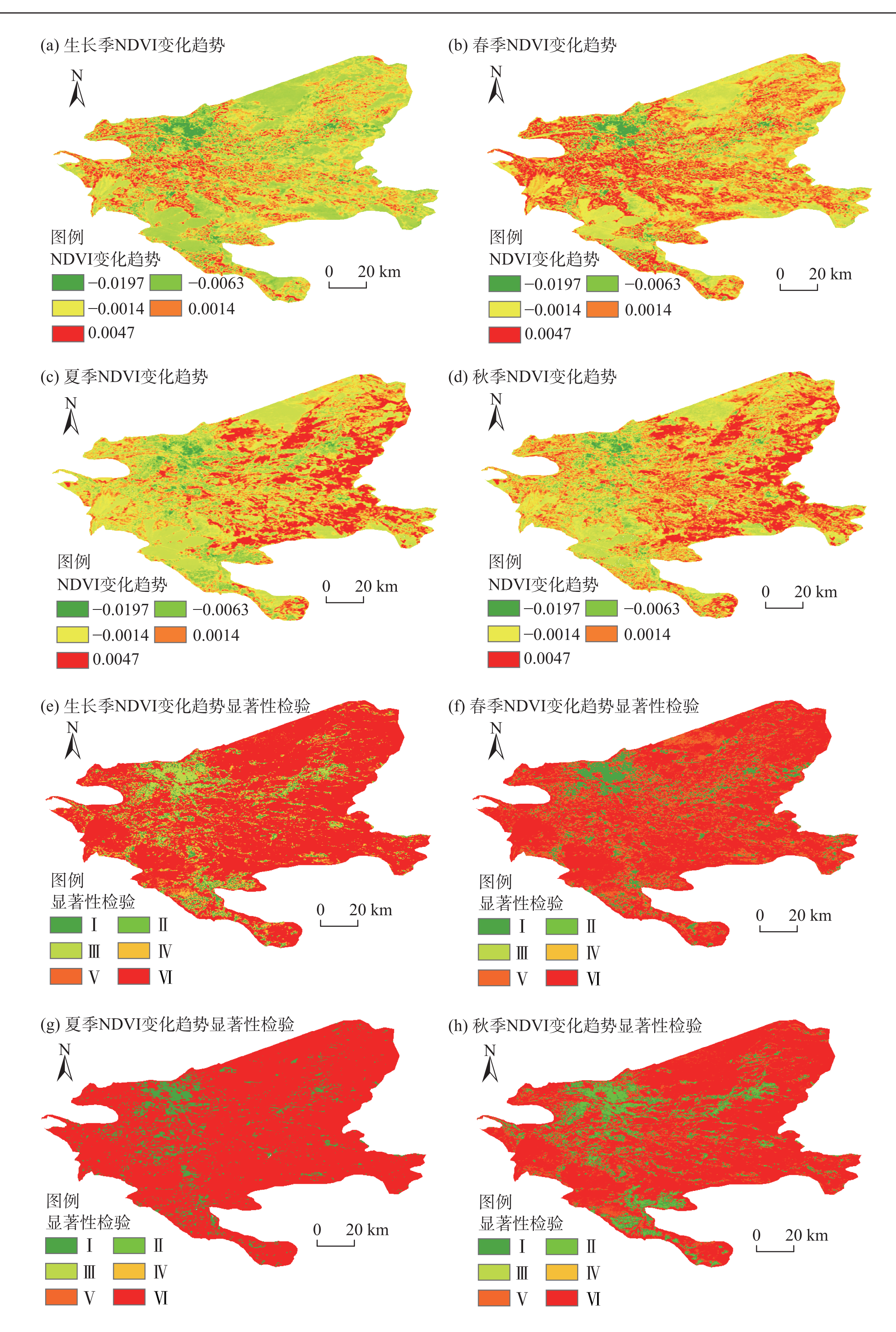
秋季NDVI年际变化呈极显著增长趋势(R^2=0.8638，P<0.01)，在2000—2011年间，除2004年和2007年负增长外，其余年份呈持续正增长趋势，2012—2020年呈波动正负交替增长趋势。NDVI同比变化总体呈微弱递减趋势，对比2000年变化，20 a间呈持续增长趋势(图2d)。

2.2　喀什三角洲不同季节空间尺度NDVI变化特征

对2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI进行变化趋势分析和显著性检验(图3)，统计NDVI面积变化占比情况见表1。NDVI整体以增加趋势为主，呈增加趋势面积占总面积89.2%，局部地区出现退化。不同季节NDVI变化趋势在空间上各有不同，生长季NDVI空间增加趋势为$1.9\times10^{-3}\cdot a^{-1}$(图3a，$P$<0.01)。其中，不显著退化区域在全区均有分布，面积占6%，主要集中在人类活动比较频繁区域；显著退化区域面积仅1%，零星分布在整个研究区；极显著退化面积占3%，主要分布在喀什市、疏勒县、疏附县及伽师县城镇周边，另外平原区有零星分布；不显著增加区域面积占10%，零散分布在研究区中部、南部和西部地区；显著增加区域分布在人类活动集中区域，面积占5%；极显著增加区域在整个三角洲分布广泛，面积占比约75%，除城镇化发展和人类工程活动频繁区域外均有分布(图3e)。

春季NDVI空间增加趋势较弱(slope=$1.0\times10^{-3}\cdot a^{-1}$，$P$<0.01，图3b)，变化不显著区域占25.8%，主要分布在远离城市的平原区，出现退化趋势面积很小，主要集中分布在喀什市、疏勒县城镇区，大部分地区呈显著极显著增加趋势，面积约占71.2%，大面积分布在城镇区以外的平原(图3f)。

夏季NDVI增加趋势在4个季节中最明显(slope=$2.6\times10^{-3}\cdot a^{-1}$，$P$<0.01，图3c)，变化趋势不显著区域面积较春季较小，占比21.6%，主要在研究区相对固定的农耕区，呈退化趋势面积占比6.4%，其中退化明显区域分布在喀什市、疏勒县、伽师县、英吉沙县和疏附县城镇发展集中区域，退化非常明显区域分布在一市六县城乡结合部和英吉沙县南侧山



注：Ⅰ为极显著减少，$P<0.01$；Ⅱ为显著减少，$P<0.05$；Ⅲ为不显著减少，$P>0.05$；Ⅳ为不显著增加，$P>0.05$；Ⅴ为显著增加，$P<0.05$；Ⅵ为极显著增加，$P<0.01$。

图3　2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI变化趋势及显著性检验

Fig. 3　NDVI change trend and significance test in different seasons in the Kashi Delta during 2000—2020

表1 2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI变化趋势

Tab. 1 NDVI trends in different seasons in the Kashi Delta during 2000—2020

季节	斜率/$10^{-3}\cdot a^{-1}$	变化趋势面积占比/%					
		不显著减少	显著减少	极显著减少	不显著增加	显著增加	极显著增加
生长季	1.9**	5.50	1.10	3.10	10.40	5.40	74.50
春季	1.0**	6.50	1.00	2.00	19.30	11.40	59.80
夏季	2.6**	8.70	2.00	4.40	12.90	5.70	66.30
秋季	1.2**	0.00	0.00	8.70	0.00	0.00	91.30

注：*表示$P<0.05$；**表示$P<0.01$。下同。

前平原，显著增加面积仅占5.7%，极显著增加面积占比为66.4%（图3g）。

秋季NDVI变化趋势与其他3个季节存在较大差异（slope=$1.2\times10^{-3}\cdot a^{-1}$，$P<0.01$，图3d），变化趋势以极显著退化和极显著增加为主，极显著退化面积占8.7%，沿南北向分布在喀什市至英吉沙一带，极显著增加面积占91.3%，主要分布在喀什市以东的三角洲区域（图3h）。

2.3 喀什三角洲不同季节NDVI与气候因子响应关系

2.3.1 喀什三角洲不同季节气候因子年际变化 图4a显示，21 a间降水量年际变化呈增加趋势，但季节差异比较明显。由图4b可知，生长季降水量集中在

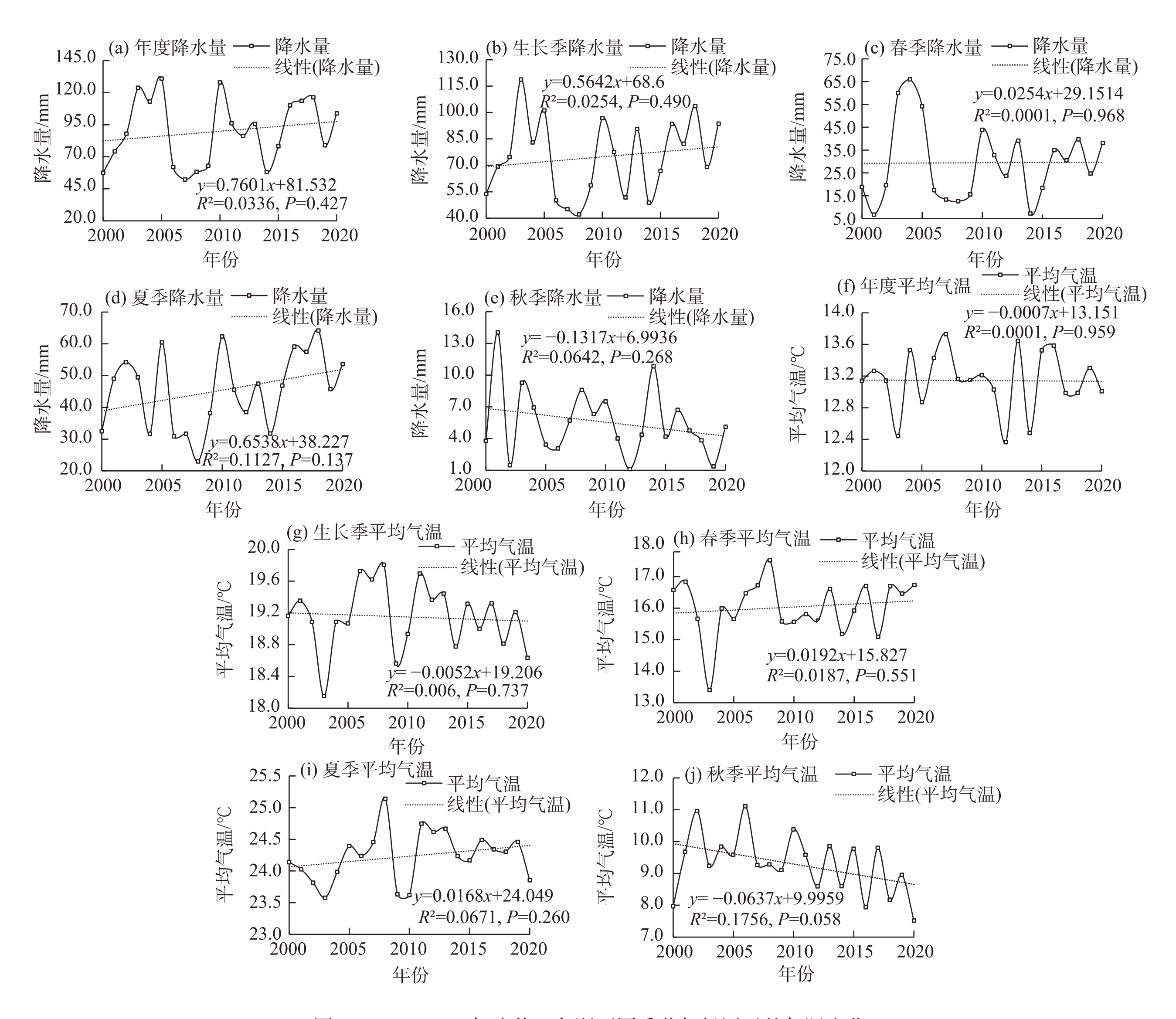


图4 2000—2020年喀什三角洲不同季节气候因子的年际变化

Fig. 4 Interannual variation of different seasonal climatic factors in the Kashi Delta during 2000—2020

40.0~120.0 mm间呈上下波动增加趋势，最大降水量118.8 mm，最小降水量42.0 mm，平均降水量74.8 mm，变化强度0.01 mm·a^{-1}，最大降幅51.1 mm。春季降水量在5.0~66.0 mm间浮动变化，呈微弱增加趋势，变化强度0.03 mm·a^{-1}，最大66.0 mm，最小6.8 mm，最大变幅40.5 mm，21 a间平均降水量29.4 mm（图4c）。夏季降水量在23.0~64.1 mm间呈波动增加趋势，变化强度0.02 mm·a^{-1}，最大降幅29.6 mm，多年平均降水量45.4 mm（图4d）。秋季降水量集中在1.1~14.1 mm之间，呈波动较少趋势，变化强度−0.05 mm·a^{-1}，最大变幅−12.6 mm，平均降水量为5.6 mm（图4e）。

从图4f看，21 a间平均气温在12.4~13.7 ℃之间变化，无明显升降趋势（R^2=0.0001），但季节分配不均匀，温差较大。据图4g可知，平均气温在生长季呈波动下降趋势，最大变幅−1.25 ℃，最高19.8 ℃，最低18.2 ℃，多年均温19.2 ℃。春季在13.4~17.5 ℃之间呈波动上升趋势，最高17.5 ℃，最低13.4 ℃，21 a间平均气温16 ℃（图4h）。夏季平均气温呈波动上升趋势，在23.6~25.1 ℃之间波动变化，2009年出现较大变化，变幅−1.51 ℃，多年均温24.2 ℃（图4i）。秋季平均气温在7.5~11.1 ℃间呈浮动下降趋势，在2007—2009年间变化较小，其他年份变幅超过1 ℃，最大变幅−1.72 ℃，多年均温9.3 ℃（图4j）。

2.3.2 喀什三角洲不同季节NDVI对平均气温、降水量的响应 2000—2020年研究区不同季节NDVI对平均气温、降水量的相关分析见表2。结果显示，生长季NDVI与平均气温、秋季NDVI与平均气温和降水量呈不显著负相关，其他季节NDVI与平均气温、降水量呈不显著正相关，表明不同季节NDVI对平均气温、降水量的响应关系不显著。考虑到NDVI波动变化及其对气候因子时滞性响应，根据NDVI波动变化特征曲线，从2000—2005、2006—2010、2011—2015、2016—2020年4个时间段统计分析，得出4个季节NDVI与前季均温和降水量相关性分别为16组；其中，NDVI与前季气温呈不显著负相关的有12组、呈显著负相关的有1组、呈不显著正相关的有3组；NDVI与前季降水量呈不显著正相关的有11组、呈不显著负相关的有5组，表明NDVI对平均气温的时滞性响应主要呈负相关，NDVI对降水量的时滞性响应主要呈正相关。

采用Pearson相关分析法，对空间尺度气温和降水量与NDVI响应关系进行了分析和显著性检验。

表2 2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI与同期平均气温、降水量的相关性

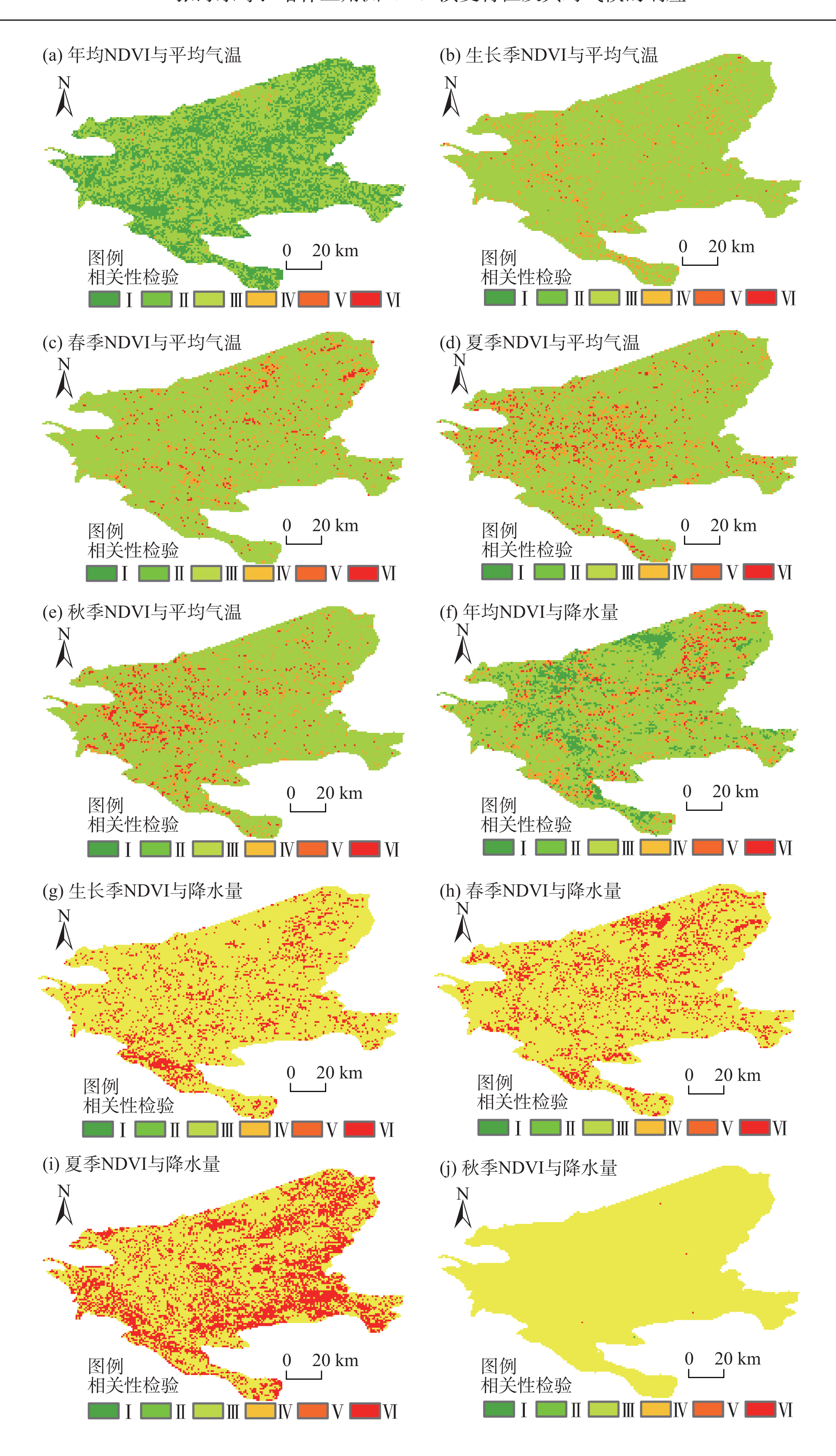
Tab. 2 Correlation between NDVI and average temperature, precipitation in different seasons in the Kashi Delta during 2000—2020

年份	不同季节NDVI	平均气温/℃		降水量/mm	
		同季均温	前季均温	同季降水量	前季降水量
2000—2020	生长季	−0.085	−0.025	0.241	0.287
	春季	0.013	0.081	0.262	0.302
	夏季	0.276	0.116	0.402	0.048
	秋季	−0.141	0.231	−0.279	0.326
2000—2005	生长季	−0.282	−0.072	0.726	0.533
	春季	−0.526	−0.004	0.821*	0.729
	夏季	0.446	−0.104	0.067	0.741
	秋季	−0.160	−0.244	0.017	0.637
2006—2010	生长季	−0.835*	0.034	0.870*	0.589
	春季	−0.557	−0.073	0.689	0.417
	夏季	−0.441	−0.130	0.752	0.811
	秋季	0.702	−0.660	0.055	0.727
2011—2015	生长季	−0.447	0.697	0.001	−0.540
	春季	0.414	0.504	−0.040	−0.251
	夏季	−0.840*	−0.045	−0.185	−0.547
	秋季	0.799	−0.394	0.259	0.564
2016—2020	生长季	0.274	−0.933*	−0.347	0.198
	春季	−0.181	−0.302	−0.481	0.199
	夏季	0.154	−0.408	−0.041	−0.298
	秋季	0.476	−0.036	−0.946*	−0.589

注：NDVI为归一化植被指数。

由图5可以看出，不同季节气温和降水量对NDVI影响在空间上不尽相同。平均气温对NDVI影响整体呈不显著相关，面积占99.5%（图5a）。生长季平均气温与NDVI呈显著极显著正相关面积占比不足8%，主要分布在三角洲中西部区域，并向东南方向递减，其余呈不显著相关（图5b）。春季平均气温与NDVI相关性区域分布在三角洲东北部区域，自北向南递减，显著正相关面积占8.7%，极显著正相关面积仅占2.6%（图5c）。夏季平均气温和NDVI正相关区域主要分布在三角洲中西部，显著极显著正相关面积占17.9%（图5d）。秋季平均气温和NDVI表现显著极显著正相关区域主要分布在三角洲西部，南部山前平原有少量分布，面积占14.7%（图5e）。

降水量对NDVI影响整体呈正相关，面积占88.4%，其中，不显著正相关面积占74.8%，显著极显著正相关面积占13.5%，负相关面积占比很小（图5f）。生长季降水量对NDVI影响显著正相关区域主



注：Ⅰ为不显著负相关，$P>0.05$；Ⅱ为显著负相关，$P<0.05$；Ⅲ为极显著负相关，$P<0.01$；Ⅳ为不显著正相关，$P>0.05$；Ⅴ为显著正相关，$P<0.05$；Ⅵ为极显著正相关，$P<0.01$。

图5 2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI与降水量、气温相关性

Fig. 5 Correlation of NDVI with precipitation and temperature in different seasons in the Kashi Delta during 2000—2020

要分布在英吉沙县南部山前平原，面积占13.7%，其余呈显著正相关，面积占比很小（图5g）。春季降水量与NDVI显著正相关区域占16.6%，主要分布在喀什三角洲中北部（图5h）。夏季降水量对NDVI显著正相关区域主要分布在三角洲西南部山前平原和东南部荒漠区域，由南向北递减，面积占34.9%（图5i）。秋季降水量与NDVI空间相关性不明显（图5j）。

3 讨论

本文通过对2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI变化趋势的研究，结果表明，4个季节NDVI均呈波动增长趋势[25]；生长季、春、夏、秋季增加速度分别为$1.9\times10^{-3}\cdot a^{-1}$（$P<0.01$）、$1.0\times10^{-3}\cdot a^{-1}$（$P<0.01$）、$2.6\times10^{-3}\cdot a^{-1}$（$P<0.01$）、$1.2\times10^{-3}\cdot a^{-1}$（$P<0.01$）。NDVI呈显著极显著增加趋势区域主要在城镇区以外的广大三角洲，自西向东变化趋势逐渐增大，面积占比分别为79.8%（$P<0.05$）、71.2%（$P<0.05$）、72.1%（$P<0.05$）、91.3%（$P<0.05$），小面积退化区域主要分布在三角洲各县市城镇区周边[26]。NDVI增加是因为喀什地区近年来采取的生态保护和恢复工程改善了区域生态环境[23]；喀什噶尔河流域水资源补给以冰雪融水为主，全球气候变暖导致研究区河流径流量增大，为植被生长提供了水资源保障，加之短期人类活动引起的土地利用结构变化对NDVI影响比较直接[26]；大量耕地替代了天然草地，平原区农田植被覆盖显著增加，同时各县市城镇建设扩张，导致了小部分地区NDVI出现退化[27]。

已有研究认为，在研究区域NDVI与气候因子相关分析时，年尺度上研究结果多为不显著相关性[28-29]。本文分别从时间尺度和空间尺度研究了2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI对气候因子的响应也验证了这一点。结果表明，平均气温、降水量对NDVI影响不显著相关，两者面积占比分别为99.5%和86.5%[30-33]，整体上NDVI与降水量相关性强于平均气温。但降水量和平均气温对NDVI的影响存在较大季节差异，在不同时间段表现不尽相同。生长季NDVI与降水量以正相关为主，春季NDVI与平均气温以正相关为主，夏季NDVI与降水量正相关，而秋季NDVI与降水量呈负相关[34]；秋季NDVI与气温呈负相关[35]；生长季NDVI与平均气温呈不显著负相关[36]；夏季NDVI与平均气温呈不显著正相关，春季NDVI与降水量呈不显著正相关，这与相关研究不一致的原因可能是NDVI对海拔响应也比较敏感，喀什三角洲地处低海拔盆地区，植被对气温和降水的响应较小[37-38]；虽然植被生长受水热条件的共同作用，但由于时间和空间尺度不同，对研究结果也有一定的影响[39]。然而，气候因子在不同区域对NDVI影响存在显著作用[40]，生长季平均气温对NDVI显著作用区域主要分布在三角洲中西部并向东南方向递减，春季主要分布在三角洲东北部自北向南递减，夏季主要分布在中西部，秋季分布在西部区域和南部山前平原的小部分区域。生长季降水量对NDVI有显著作用区域主要分布在英吉沙县南部山前平原，春季主要分布在三角洲中北部，夏季主要分布在三角洲西南部山前平原和东南部荒漠区域，并由南向北递减，秋季无明显显著作用。

考虑到NDVI波动性变化对气候因子时滞性响应，从整体上研究了2000—2020、2000—2005、2006—2010、2011—2015、2016—2020年5个时间段生长季、春、夏、秋季NDVI与平均气温、降水量的同季和前季变化。结果表明，除2011—2015年外，不同季节NDVI与降水量相关性普遍大于与平均气温相关性，说明降水量对NDVI滞后性强于平均气温。

4 结论

基于MODIS植被数据和逐月平均气温、逐月降水量数据，对2000—2020年喀什三角洲不同季节NDVI时空变化特征及其对平均气温、降水量的响应关系进行了研究分析，得出以下结论：

（1）2000—2020年喀什三角洲NDVI整体呈极显著上升趋势，生长季、春季、夏季、秋季呈显著极显著增加的面积分别为8163 km^2、7280 km^2、7367 km^2和9334 km^2，面积占比分别为79.8%、71.2%、72.1%和91.3%。

（2）研究区NDVI对平均气温、降水量的整体响应关系不显著，降水量对NDVI的影响占主导地位，但存在季节差异和空间显著作用。生长季NDVI与平均气温呈负相关、与降水量呈正相关，春季、夏季NDVI与平均气温、降水量均呈正相关，秋季NDVI与平均气温、降水量均呈负相关。

（3）研究区平均气温对NDVI的时滞响应以负

相关为主,降水量对NDVI的时滞响应以正相关为主,表明气温的升高对植被生长有抑制作用,降水量的增加对植被生长有较好的促进作用,且降水量比平均气温对NDVI的滞后性强。

参考文献(References)

[1] 黄庆阳, 曹宏杰, 谢立红, 等. 五大连池火山熔岩台地草本层物种多样性及环境解释[J]. 生物多样性, 2020, 28(6): 658-667. [Huang Qingyang, Cao Hongjie, Xie Lihong, et al. Species diversity and environmental interpretation of herb layer in lava platform of Wudalianchi, China[J]. Biodiversity Science, 2020, 28(6): 658-667.]

[2] 陈金林. 青海湖国家地质公园及邻区景观资源、环境评价及可持续发展[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017. [Chen Jinlin. Evaluation on landscape resources, environment and sustainable development in Qinghai Lake National Geopark and its neighbouring area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.]

[3] 马全林, 张德奎, 袁宏波, 等. 乌兰布和沙漠植被数量分类及环境解释[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 160-167. [Ma Quanlin, Zhang Dekui, Yuan Hongbo, et al. Numerical classification and environmental interpretation of desert vegetation in the Ulan Buh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 160-167.]

[4] 隋悦, 鹿琳琳, 张熙, 等. 2000—2013年新疆植被覆盖变化多尺度遥感分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(3): 1-8. [Sui Yue, Lu Linlin, Zhang Xi, et al. Multi-scale remote sensing analysis of vegetation cover changes from 2000 to 2013 in Xinjiang[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(3): 1-8.]

[5] 刘莎莎. 新疆植被覆盖变化及其对气候的敏感性分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017. [Liu Shasha. Vegetation cover change and its sensitivity to climate in Xinjiang[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.]

[6] 胡仁杰, 陈璇黎, 陈金, 等. MODIS NDVI饱和性对高寒草甸草地生物量遥感估测的影响——以青藏高原东缘为例[J]. 生态学报, 2024, 44(14) : 6357-6372. [Hu Renjie, Chen Xuanli, Chen Jin, et al. MODIS NDVI saturation asseaament of alpine meadow grassland biomass estimation using remote sensing: A case study in the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6357-6372.]

[7] Wang F, Ma Y M, Darvishzadeh R, et al. Annual and seasonal trends of vegetation responses and feedback to temperature on the Tibetan Plateau since the 1980s[J]. Remote Sensing, 2023, 15 (2475): 2475, doi: 10.3390/rs15092475.

[8] Xu B, Qi B, Ji K, et al. Emerging hot spot analysis and the spatial-temporal trends of NDVI in the Jing River Basin of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(2): 55, doi: 10.1007/s12665-022-10175-5.

[9] 戴声佩, 张勃, 王海军. 中国西北地区植被NDVI的时空变化及其影响因子分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(3): 315-321. [Dai Shengpei, Zhang Bo, Wang Haijun. Spatio-temporal change of vegetation index NDVI in northwest China and its influencing factors[J]. Journal of Geo-information Science, 2010, 12(3): 315-321.]

[10] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 1982—2013年基于GIMMS-NDVI的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208. [Liu Yang, Li Chengzhi, Liu Zhihui, et al. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6198-6208.]

[11] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 等. 近60 a来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4) : 822-829. [Zhang Yin, Tuerxunbai Gulixian, Su Litan, et al. Spatial and temporal characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 822-829.]

[12] 慈晖, 张强. 新疆NDVI时空特征及气候变化影响研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 662-671. [Ci Hui, Zhang Qiang. Spatio-temporal patterns of NDVI variations and possible relations with climate changes in Xinjiang Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(5): 662-671.]

[13] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982—2015年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 70-80. [He Hang, Zhang Bo, Hou Qi, et al. Variation characteristic of NDVI and its response to climate change in northern China from 1982 to 2015[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(1): 70-80.]

[14] 庞朝悦, 刘玉婷, 张齐飞, 等. 气候因子对南疆三地州植被净初级生产力演变特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(3): 82-89. [Pang Chaoyue, Liu Yuting, Zhang Qifei, et al. The impact of climatic factors on the characteristics of vegetation net primary productivity evolution in three prefectures of southern Xinjiang[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(3): 82-89.]

[15] 麦麦提吐逊·麦麦提, 马合木江·艾合买提, 陶洪飞, 等. 基于遥感的疏勒县植被覆盖时空变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 121-129. [Maimaiti Maimaitituxun, Aihemaiti Mahemujiang, Tao Hongfei, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Shule County based on remote sensing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 121-129.]

[16] 张新时. 中华人民共和国植被图(1:1000000)[M]. 北京: 地质出版社, 2007. [Zhang Xinshi. Vegetation map of the People's Republic of China (1:1000000)[M]. Beijing: Geology Press, 2007.]

[17] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.

[18] 玛依拉·买买提艾力. 新疆1961—2020年气候季节时空分布及其变化特征[J]. 陕西气象, 2024(2): 23-29. [Maimaitiaili Mayila.

Spatiotemporal distribution and variation characteristics of climate seasons in Xinjiang from 1961 to 2020[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2024(2): 23-29.]
[19] 陈春波, 李刚勇, 彭建. 1981—2018年新疆草地归一化植被指数时空特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1537-1552. [Chen Chunbo, Li Gangyong, Peng Jian. Spatio-temporal characterristics of Xinjiang grasland NDVI and its response to climate change from 1981 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1537-1552.]
[20] 缪利, 陆晴, 刘根林, 等. 1999—2019年青藏高原不同植被类型NDVI时空演变特征及其对气候因子的响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 97-105. [Miao Li, Lu Qing, Liu Genlin, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of NDVI of different vegetation types and its response to climate factors on the Qinghai-Tibet Plateau from 1999 to 2019[J]. Research of Soiland Water Conservation, 2023, 30(1): 97-105.]
[21] 袁先雷, 彭志潮, 刘雪宁. 新疆地区植被对多时间尺度干旱的响应研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(3): 129-136. [Yuan Xianlei, Peng Zhichao, Liu Xuening. Different time-scale responses of vegetation to the SPEI drought index in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(3): 129-136.]
[22] 杨艳萍, 陈建军, 覃巧婷, 等. 2000—2018年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 234-241. [Yan Yanping, Chen Jianjun, Qin Qiaoting, et al. Temporal and spatial variation of vegetation and its response to topography, climate and land use in Guangxi during 2000—2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 234-241.]
[23] 郑春燕, 梁俊红, 王建. 中巴经济走廊归一化植被指数(NDVI)时空变化及影响因素分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(9): 1147-1156. [Zheng Chunyan, Liang Junhong, Wang Jian. The impact of climate and land use on the spatio-temporal changes of NDVI of China-Pakistan economic corridor[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(9): 1147-1156.]
[24] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592. [A Duo, Zhao Wenji, Gong Zhaoning, et al. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the North China Plain from 1981 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 576-592.]
[25] 孙与襄, 麦麦提吐逊·麦麦提, 马合木江·艾合买提, 等. 1995—2020年喀什市植被覆盖度时空动态变化研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(1): 71-78. [Sun Yuxiang, Maimaiti Maimaitiuxun, Aihemaiti Mahemujiang, et al. Research on the temporal and spatial dynamic changes of vegetation coverage in Kashgar City from 1995 to 2020[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(1): 71-78.]
[26] 麦麦提吐逊·麦麦提, 马合木江·艾合买提, 陶洪飞, 等. 1993—2019年喀什噶尔河流域绿洲植被覆盖度时空变化分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 28-32. [Maimaiti Maimaitituxun, Aihemaiti Mahemujiang, Tao Hongfei, et al. Spatio-temporal variations in vegetation coverage in Kashgar Rivers Oasis from 1993 to 2019[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(7): 28-32.]
[27] 许玉凤, 杨井, 李卫红, 等. 1982—2013年新疆不同植被生长时空变化[J]. 草业学报, 2016, 25(1): 47-63. [Xu Yufeng, Yang Jing, Li Weihong, et al. Spatial-temporal change in different vegetation growth of Xinjiang from 1982 to 2013[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 47-63.]
[28] 徐丽萍. 黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2008. [Xu Liping. Influce and reciprocal effects of vegetation rehabilitation on regional climate in Loess Plateau[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2008.]
[29] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968. [Zhang Hanyu, Fang Nufang, Shi Zhihua. Spatio-temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 3960-3968.]
[30] 张远东, 徐应涛, 顾峰雪, 等. 荒漠绿洲NDVI与气候、水文因子的相关分析[J]. 植物生态学报, 2023, 27(6): 816-821. [Zhang Yuandong, Xu Yingtao, Gu Fengxue, et al. Correlation analysis of NDVI with climate and hydrological factors in oasis and desert[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2023, 27(6): 816-821.]
[31] 苏红军, 许仲林. 2000—2015年新疆植被指数的时空动态分析[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(10): 48-55. [Su Hongjun, Xu Zhonglin. Temporal and patial dynamics analysis of vegetation index in Xinjiang from 2000 to 2015[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(10): 48-55.]
[32] 王娜, 牛婷, 文方, 等. 新疆1982—2015年植被变化及气候影响因素分析[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(3): 28-34. [Wang Na, Niu Ting, Wen Fang, et al. Analysis of vegetation variations and climate influencing factors in Xinjiang from 1982 to 2015[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2020, 42(3): 28-34.]
[33] 杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 1998—2007年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 436-445. [Yang Guanghua, Bao Anming, Chen Xi, et al. Study of the vegetation cover change and its driving factors over Xinjiang during 1998—2007[J]. Journal of Glaciology and Geocryolog, 2009, 31(3): 436-445.]
[34] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 1982—2012年新疆植被NDVI的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 应用生态学报, 2015(12): 3567-3578. [Du Jiaqiang, Ahati Jiaerheng, Zhao Chenxi, et al. Dynamic changes in vegetation NDVI from 1982 to 2012 and its responses to climate change and human activities in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015(12): 3567-3578.]
[35] 董璐, 赵杰, 刘雪佳, 等. 1982—2015年新疆地区植被生长对气温的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2165-2170. [Dong Lu, Zhao Jie, Liu Xuejia, et al. Responses of vegetation growth to temperature during 1982—2015 in Xinjiang, China[J]. Chinese Jour-

nal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2165−2170.]

[36] 阿力木·依明, 木合塔尔·艾买提, 朱敏. 近二十年喀什地区植被覆盖的时空变化与影响因素分析[J]. 北方园艺, 2023(4): 60−70. [Yiming Alimu, Aimaiti Muhetaer, Zhu Min. Spatio-temporal variations of vegetation coverand in fluencing factors in Kashi region from recent 20 years[J]. Northern Horticulture, 2023(4): 60−70.]

[37] Jiang S S, Chen X, Smettem K, et al. Climate and land use influences on changing spatiotemporal patterns of mountain vegetation cover in southwest China[J]. Ecological Indicators, 2021(121): 107193, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107193.

[38] Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(1): 45−58.

[39] 杜加强, 高云, 贾尔恒·阿哈提, 等. 近30年新疆植被生长异常值时空变化及驱动因子[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1915−1927. [Du Jiaqiang, Gao Yun, Ahati Jiaerheng, et al. Spatio-temporal patterns and driving factors of vegetation growth anomalies in Xinjiang over the last three decades[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1915−1927.]

[40] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型NDVI对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 678−691. [Liu Jing, Wen Zhongming, Gang Chengcheng. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 678−691.]

Evolutionary characteristics of NDVI in the Kashi Delta and its response to the climate

ZHANG Haidong, LI Chongbo, MENG Liqi, Adilai SAITINIYAZI, JU Xifeng

(Urumqi Comprehensive Survey Center on Natural Resources, China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China)

Abstract: The impact of climatic factors on vegetation growth was examined using MODIS vegetation index data, monthly average temperature, and precipitation data for the period 2000—2020. Linear trend analysis, Pearson correlation analysis, and partial correlation analysis were applied to study the temporal and spatial variations in normalized difference vegetation index (NDVI) across different seasons and its response to mean temperature and precipitation in the Kashi Delta of Xinjiang, China. The findings revealed the following trends: (1) NDVI in the study area showed a highly significant upward trend, with significant increases in the affected area during the growing season, spring, summer, and autumn, at 79.8%, 71.2%, 72.1%, and 91.3%, respectively. (2) Overall, NDVI showed no significant response to mean temperature and precipitation, though precipitation had a dominant influence on NDVI. Seasonal and spatial variations were observed. During the growing season, NDVI was negatively correlated with temperature and positively correlated with precipitation. In spring and summer, NDVI was positively correlated with both temperature and precipitation, while in autumn, it was negatively correlated with both. (3) The time-lag response of temperature to NDVI was mainly negative, whereas precipitation showed a mainly positive lag effect on NDVI. This suggests that increasing temperatures inhibit vegetation growth, while increased precipitation promotes it. Precipitation has a stronger lag effect on NDVI than temperature. These findings provide valuable insights for future analysis of ecological evolution in arid regions and can guide ecological protection and restoration efforts.

Key words: NDVI; spatio and temporal variation; climate factors; Kashi Delta